

論文 寒冷地における高炉スラグ微粉末混和コンクリートの強度発現

鈴木 一利^{*1}・岩城 一郎^{*2}・三浦 尚^{*3}

要旨：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートを、最初5℃で養生してある程度材齢が経過してから養生温度を20℃まで上昇させた時、高炉スラグ微粉末の粉末度、置換率および養生温度を上昇させた時期が圧縮強度の増進に及ぼす影響を調べた。高炉スラグ微粉末の混和による圧縮強度の低減は、材齢28日あるいは材齢56日で養生温度を上昇させると、改善できることを確認した。また、材齢28日あるいは材齢56日で養生温度を上昇させた場合、粉末度8000cm³/g、置換率50%の配合は本実験のシリーズの中で最も大きい圧縮強度の増進を示した。

キーワード：高炉スラグ微粉末、強度発現、粉末度、置換率、養生温度

1. はじめに

化学抵抗性の向上、および水和熱の低減などを目的として[1]、高炉スラグ微粉末（以下GGBSと記す）を混和したコンクリートが使用されている。しかし、GGBSの混和は以上のような利点がある反面、コンクリートの初期強度を減少させるという不利な影響を及ぼすことも確認されている。この影響は、GGBSの置換率が大きくなると、より顕著に現われる傾向にある[2]。さらに、このようなコンクリートは強度発現に対して養生温度の影響を受けやすいため[3]、低温下で養生される場合には、注意が必要である。

GGBSを混和したコンクリートに対して、常に一定の温度で低温養生された場合の強度増進と、常温で養生された場合の強度増進とを比較する研究は過去において行われた[4]～[7]。しかし、実際のコンクリート構造物では、コンクリートが打設された時期により、打設された時は低温であっても、日時の経過とともに外気温がだんだん上昇していくという場合もある。本研究はこのような場合を想定している。すなわち本研究の目的は、GGBSを混和したコンクリートが、低温環境下で打設された後、ある程度材齢が進んでから養生温度を5℃から20℃に上昇させた場合、コンクリートの圧縮強度がどの程度増進するか、またその増進傾向がGGBSの置換率と粉末度および養生温度を5℃から20℃に上昇させる時期によって、どのように異なるかを調べることである。

2. 実験材料および方法

2. 1 実験材料

本研究において用いられたGGBSと普通ポルトランドセメントの化学分析結果を、それぞれ表-1、表-2に示す。GGBSの粉末度が4100cm³/gのものを以下GGBS4、5960cm³/gのものを以下GGBS6、8240cm³/gのものを以下GGBS8と記す。セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材は山砂（宮城県大和町産、比重2.53、粗粒率2.

^{*1} 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

^{*2} 東北大学助手 工学部土木工学科、工修（正会員）

^{*3} 東北大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

表-1 GGBSの化学分析結果

	強熱減量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
GGBS 4	0.1	33.1	13.9	0.2	42.2	6.7
GGBS 6	0.2	33.5	13.8	0.2	42.1	6.8
GGBS 8	0.05	33.2	14.4	0.5	41.0	5.5

(単位：%)

表-2 普通ポルトランドセメントの物理的および化学的分析結果

比重	比表面積 (cm ² /g)	凝結			圧縮強さ			MgO (%)	SO ₃ (%)	強熱減量 (%)	Cl (%)
		水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)	3日 (MPa)	7日 (MPa)	28日 (MPa)				
3.15	3290	27.9	2-22	3-34	16.9	27.0	42.0	1.5	1.8	1.7	0.006

71) を使用した。

2. 2 実験方法

本研究はモルタル供試体を用いて行うこととした。その理由として、コンクリート供試体を使用した場合モルタル供試体と比べ、養生温度のコントロールが難しくなること、低温養生槽の容量が限られていること、およびGGBSの粉末度、置換率、温度条件などが強度発現に及ぼす影響の程度は、コンクリート供試体とモルタル供試体とで致命的な違いがあるとは思われないことが挙げられる。

供試体はφ5×10の円柱供試体とし、モルタルの配合はすべて水：結合材：細骨材=1：2：5とした。一般にGGBSの置換率は、耐硫酸塩性の向上を目的とする場合は50%~70%、アルカリシリカ反応の抑制を目的とする場合には40%~70%必要とされる[8]。これらを考慮に入れて、本実験では置換率をそれぞれの粉末度に対し50%および70%とした。また比較のために、普通ポルトランドセメントのみの配合、つまり置換率0%の配合(以下置換率0%と記す)についても実験を行った。

円柱供試体は、打設後直ちに20℃と5℃の恒温室にそれぞれ置いた。さらに、材齢28日と材齢56日で、5℃の恒温室に置いた供試体の一部を20℃の恒温室に移した。ここで、5℃という養生温度は寒冷地における日平均気温を想定した温度である。圧縮強度試験は材齢7, 14, 28, 56, 91日で行った。

養生方法は、寒冷地での現場の状況を考慮して設定することにした。まず、気中養生については、GGBSを低温で養生した場合、十分な強度が得られないことが明らかになっているため、実際の現場でも用いてはいけないと判断し、本研究の対象から除外した。また、実際の施工において、常に水中養生を行うことは難しいと考えられるため、これも対象外とした。その結果、本実験では封かん養生を採用した。

3. 実験結果および考察

図-1～図-7に各配合の圧縮強度試験結果を示す。

図-1および図-2に示すGGBS 6の圧縮強度試験結果を例にとり、5℃一定養生と20℃一定養生の強度発現性に着目すると、置換率50%、70%ともに、5℃一定養生を行った供試体の各材齢の圧縮強度は、20℃一定養生の圧縮強度の半分程度であることがわかる。この点は、低温環境下で強度発現性の劣るGGBSを混和したコンクリートの特徴を顕著に裏付けるものである。それに対して、材齢28日あるいは材齢56日で養生温度を上昇させた場合の圧縮強度は、5℃一定養生のものと比較して顕著に増進し、20℃一定養生の圧縮強度の値に確実に近づいていった。このことは、材齢28日あるいは材齢56日において養生温度を上昇させるまでは、養生温度が低いために水和反応が遅れているが、養生温度を上昇させることにより水和反応が活発になった結果と考えられる。GGBSを混和したコンクリートの場合、特に5℃一定養生と20℃一定養生の圧縮強度差が大きいいため、養生温度を上昇させた後の圧縮強度の増進が、顕著に現われたのである。この傾向は、以下に示す全てのGGBSを混和したコンクリートに対しても当てはまる。(図-3～図-6参照) また、図-7より、GGBSを混和しない配合では、GGBSを混和した配合に比べて、低温下での圧縮強度の低減が少なく、養生温度上昇後の圧縮強度の増進もさほど顕著ではないことが確認された。

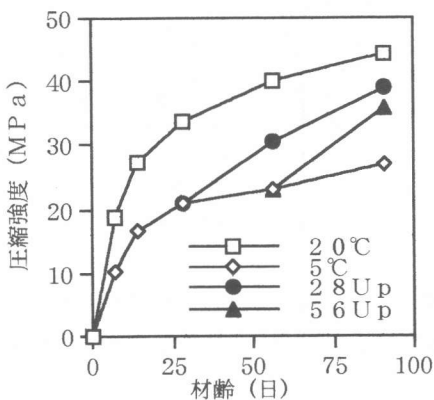


図-1 GGBS 6, 置換率50%

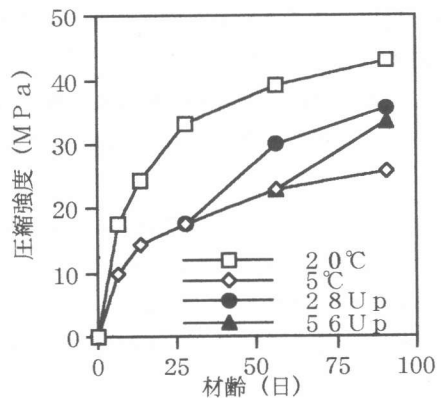


図-2 GGBS 6, 置換率70%

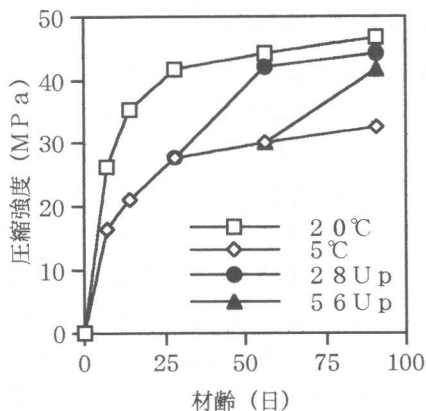


図-3 GGBS 8, 置換率50%

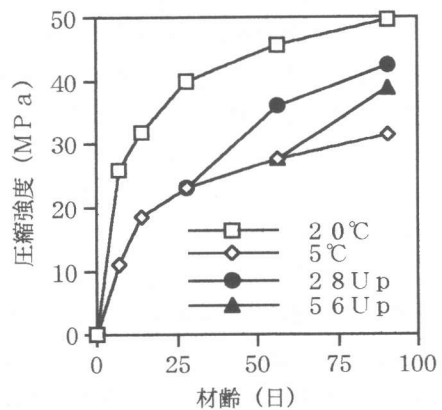


図-4 GGBS 8, 置換率70%

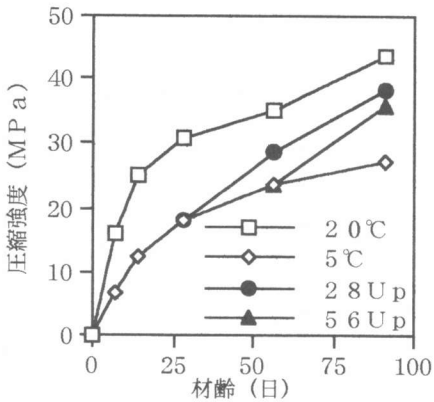


図-5 GGBS 4, 置換率 50%

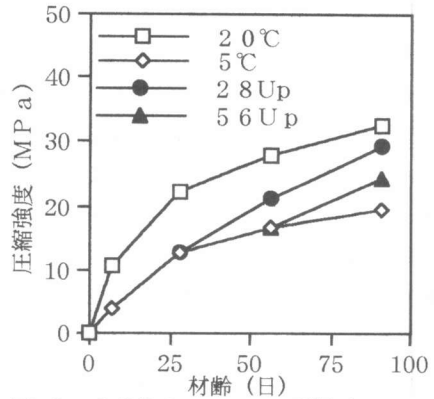


図-6 GGBS 4 000, 置換率 70%

本実験シリーズの中で、圧縮強度の増進量が最も大きい配合は、GGBS 8, 置換率 50%のものであった。(図-3 参照) 一般にGGBSを混和したコンクリートは、置換率が大きいほど初期材齢での強度発現が悪くなること、また粉末度が大きいほどGGBSを混和したことによって生じる初期強度の低減を改善できることが知られている [6] が、今回の実験で圧縮強度の増進量が最も大きい配合は、初期強度の発現性が最も優れたものであるという結果になった。

打設してある材齢まで5°Cで養生した後、20°Cまで養生温度を上昇させた時の圧縮強度の増進量を評価するために、20°Cで一定養生した時の圧縮強度に対する養生温度を上昇させた後の圧縮強度の比を用いる。これを以下圧縮強度比と記し百分率で示す。表-3に各配合の圧縮強度比を示す。

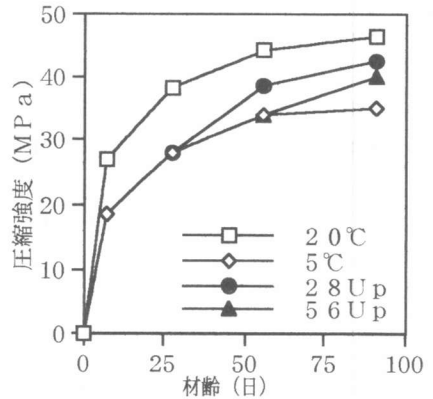


図-7 置換率 0%

材齢 28 日で養生温度を上昇させた場合と、材齢 56 日で養生温度を上昇させた場合の 28 日経過後の圧縮強度比の比較を行う。表-3より、GGBS 4, 置換率 50%を例にすると、材齢 28 日で養生温度を上昇させてそれから 28 日経過後の圧縮強度比は 82.4%, 材齢 56 日で養生温度を上昇させてそれから 28 日経過後の圧縮強度比は 82.0%であった。これから、材齢 28 日で養生温度を上昇させても、材齢 56 日で養生温度を上昇させても、それから約 1 ヶ月後の圧縮強度比に関しては目立った差がないということがわかる。この傾向はばらつきがあるものの、概ね他の配合に関しても、同様のことが言える。

圧縮強度比の図の一例として、図-8に材齢 56 日に養生温度を上昇させた場合における、GGBS 4, 置換率 70%, GGBS 8, 置換率 50%および置換率 0%の材齢 28 日以降の圧縮強度比を比較した図を示す。GGBSを混和した供試体の圧縮強度比は混和しない供試体の圧縮強度比と比較して、5°C養生条件下では明らかに小さくなることを確認した。特に粉末度が小さく置換率が大きいGGBS 4, 置換率 70%の供試体においては、材齢 28 日で 20

表-3 圧縮強度比

	材齢 (日)	置換率50%			置換率70%			置換率0%		
		5℃	28Up	56Up	5℃	28Up	56Up	5℃	28Up	56Up
GGBS4	28	59.0	59.0		57.5	57.5		73.1	73.1	
	56	68.3	82.4	68.3	59.9	76.3	59.9	77.0	87.6	77.0
	91	62.7	87.8	82.0	59.5	90.3	75.6	76.1	91.5	86.5
GGBS6	28	62.2	62.2		53.1	53.1				
	56	57.3	76.1	57.3	58.7	76.7	58.7			
	91	61.1	87.9	81.2	59.6	82.7	77.8			
GGBS8	28	65.9	65.9		57.6	57.6				
	56	68.2	95.3	68.2	60.1	79.1	60.1			
	91	69.6	94.1	89.3	63.3	85.2	78.5			

て一定養生の6割程度の圧縮強度しか期待できない結果となった。

GGBS 8, 置換率50%については、材齢28日に養生温度を上昇させた場合も材齢56日に養生温度を上昇させた場合もその約一ヵ月後の圧縮強度は、圧縮強度比で約90%となり十分に圧縮強度が増進する結果となった。ただし、材齢28日に養生温度を上昇させた場合に関しては、材齢56日以降の圧縮強度の増進はそれほど見られず、頭打ちの傾向にある。これは図-3からも明らかである。

GGBS 4, 置換率70%については、養生温度上昇後、圧縮強度の増進はGGBS 8, 置換率50%の供試体ほど顕著ではない。しかし、材齢28日に養生温度を上昇させた場合、材齢56日以降も圧縮強度の増進が継続する。これは、材齢56日に養生温度を上昇させた場合の材齢91日以降についても当てはまるであろう。GGBS 4, 置換率70%の圧縮強度試験結果を示した図-6においても、材齢91日以降圧縮強度が増進する可能性があることがわかる。つまり、粉末度が低く置換率が高い配合に対しては、91日以降でも圧縮強度が増進する可能性があり、今後調べておく必要があると思われる。置換率0%の場合、材齢56日において、5℃一定養生した場合の圧縮強度比は77.0%であった。この値を表-3中のGGBSを混和した配合における5℃一定養生した場合の圧縮強度比と比較すると、高い値となった。したがって、置換率0%の場合、低温養生を行った場合の圧縮強度の低減が小さいことがわかった。

以上の結果から、GGBSを混和した配合の圧縮強度は、特に5℃一定養生条件下での初期

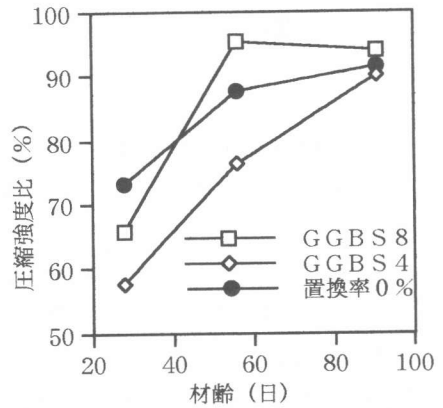


図-8 圧縮強度比の比較 (56Up)

材齢においては、GGBSを混和しない配合の圧縮強度よりも小さいが、材齢28日で養生温度を上昇させた場合、GGBSを混和した配合の圧縮強度が顕著に増進し、圧縮強度の増進傾向もGGBSを混和しなかった配合の圧縮強度の増進よりも明らかに大きくなることがわかった。よって、5℃一定養生を行ったGGBSを混和したコンクリートの圧縮強度の低減は、材齢28日あるいは材齢56日で養生温度を上昇させることで、改善されることを確認した。

4. 結論

- (1) 封かん養生という条件下では、高炉スラグ微粉末を混和した時の低温養生における圧縮強度の低減は、材齢28日あるいは材齢56日で養生温度を上昇させることによって、改善することが出来る。
- (2) 粉末度8000 cm^3/g の高炉スラグ微粉末を置換率50%で混和した配合において、材齢28日あるいは材齢56日で養生温度を5℃から20℃に上昇させた場合の圧縮強度の増進量は、本実験で選択された配合の中で最も大きかった。
- (3) 材齢28日で養生温度を上昇させた場合と材齢56日で養生温度を上昇させた場合との、それから約一ヵ月後の20℃養生の場合に対する圧縮強度比には目立った差はない。
- (4) 低温環境下で打設する場合、その後、その気候がどのぐらい継続するかによって、高炉スラグ微粉末の適切な粉末度および置換率を調べて選択しなければならない。

参考文献

- [1] 国府勝郎:高炉スラグ微粉末,コンクリート工学,Vol.26,No.4,pp.25-31,1988.4
- [2] 小林明夫,山下裕章:高炉セメント使用上の注意点,構造物設計資料,No.87,pp.3-7,1986.9
- [3] 遠藤裕悦,児玉和己,中川修,高田誠:高炉スラグ微粉末がコンクリートの配合と強度に及ぼす影響について,高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集,pp.73-80,1987.3
- [4] 檀康弘,牧角龍憲,阪本好史,小森達也:高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの強度に及ぼす練り混ぜ方法の影響,コンクリート工学年次論文報告集,vol.12,No.1,pp.81-86,1990.6
- [5] 中本純次,戸川一夫,藤井学:高炉スラグ高含有コンクリートの強度発現特性に及ぼす養生温度の影響,第48回セメント技術大会講演集,pp.392-397,1994.4
- [6] 渡部嗣道,岡村一臣,横須賀誠一,穉山文男:シリカヒューム・高炉スラグ微粉末を使用した高強度コンクリートの諸特性,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.12,No.1,pp.99-104,1990.6
- [7] 鎌田英治,洪悦郎,林直樹:各種セメントを用いたコンクリートの強度増進性状,セメント・コンクリート論文集,No.44,pp.360-365,1990.12
- [8] 土木学会コンクリート委員会:高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針,土木学会,pp.8-9,1996
- [9] 土木学会コンクリート委員会:高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針,土木学会,pp.88-92,1996